

乾燥コンクリートの温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力と応力緩和

正 会 員 河 辺 伸 二*
正 会 員 岡 島 達 雄**

1. 序

コンクリートの使用範囲は年ごとに拡大しつつある。近年ではコンクリート構造物の多様化に伴って、常温とは異なった温度下で使用されるものや、温度の上昇・下降の繰り返しを受ける状態で使用される場合もある。また、構造部材として、拘束を受ける状況下でコンクリートが使用される場合も多い。外力荷重による作用を含めたコンクリートの熱挙動についての情報は、ますます重要になっている。

最近、マスコンクリートのひび割れ防止、制御のための温度応力発生メカニズムが解明されている^{x1),2)}。解析手法として、有限要素法、C.P.法^{x3)}等が開発されているが、温度応力を解析する際、一般的にはクリープ特性を基に応力の緩和量が算出されている。また、クリープの影響をヤング係数の低減として扱かう方法^{x4)}もある。しかし、平田ら^{x5),6),7)}は、温度応力の基本的な発生ならびにその緩和メカニズムには、クリープよりは応力緩和特性を用いた方がより合理的かつ直接的であるとして、応力緩和を用いて温度応力を解析している。これらは、マスコンクリートを研究対象としているため、セメントの水和熱による温度上昇を前提として、若材令（材令0から15日前後）での温度応力を解析している。

これに対し、本研究で対象としているのは、硬化したコンクリートの熱挙動である。硬化したコンクリートでは、山崎ら^{x8)}が定圧縮ひずみ下におけるコンクリートの熱応力について実験し、熱応力に及ぼす遷移温度状態のクリープを評価して、検討を行っている。この種の研究は、機能上種々の熱源を抱えている建物、例えば原子炉建屋などの安全性、および設計合理化に大きく貢献する^{x9),10)}と考えられる。また、最近増えつつある高層鉄筋コンクリート建物の日射による温度応力の問題^{x11)}にも適用できる。

そこで、本研究は硬化したコンクリートの定圧縮ひずみ下のコンクリートの熱挙動を、コンクリートの熱膨張係数、ヤング係数と直接応力緩和を用いて考察するものである。

クリープが、一定荷重下のひずみの時間的变化であるならば、一定ひずみ拘束下の応力の時間的变化は、応力緩和である。Taylorら^{x12)}は、コンクリートの応力緩和実験はクリープ実験に比べ、実験が困難なこともありその報告数は少ないと指摘している。Neville^{x13)}や西林ら^{x14)}が、応力緩和について実験を行い、ひずみ拘束時の設定応力や養生、供試体強度などの応力緩和に対する影響について検討を行っている。Brooks^{x15)}や谷川ら^{x16)}はコンクリートの応力緩和とクリープをそれぞれの終局値を用いて対応させている。また、Schneider^{x17,18,19)}もコンクリートの熱的性質の一つとして、各温度において応力緩和実験やクリープ実験を行っている。

また、筆者らは先に、「多軸応力を受ける乾燥コンクリートの熱膨張とクリープ^{x20)}」について実験、考察を行った。これでは、応力度/強度比が1/2以下の多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時（20～100℃）のひずみを、「温度時間換算則」を適用した温度上昇時の予測クリープ量、無応力状態の熱膨張ひずみ、載荷時の瞬間弾性ひずみより算出した。

本研究は、「温度時間換算則」を適用した温度上昇時の予測応力緩和量より、膨張ひずみ拘束応力を算出するため、次の4点について実験、考察を行った。

1) 硬化したコンクリートの30℃から100℃の温度範囲内での、温度上昇時における膨張ひずみ拘束応力を測定する。膨張ひずみ拘束応力とは、コンクリートを加熱した時の膨張ひずみを、一定に拘束するのに必要な応力とする。また本研究は、あらかじめ105℃乾燥で含有水分を放出した面取立方供試体^{x21)}を用いた。

2) 膨張ひずみ拘束応力を応力緩和を用いて考察するために、一定温度（20℃、60℃、100℃）における、一定ひずみ拘束下（一定初期設定応力レベル）の応力緩和量を測定する。

本研究では、実験のひずみレベルの設定について、圧

本論文の結果の一部は、昭和63年度日本建築学会大会ならびに昭和61年度コンクリート工学年次講演会において発表している。

* 名古屋工業大学 大学院生・工修
(株)INAX 中央研究所

** 名古屋工業大学 教授・工博

(1989年2月9日原稿受理、1989年8月2日採用決定)

縮強度に対する一定比率の応力度により、間接的にこれを規定し、初期設定応力レベルとした。この初期設定応力レベルは、応力度/強度比で表し、1/6、2/6、3/6、4/6とする。これは、コンクリートの長期許容圧縮応力度がコンクリートの設計基準強度の1/3であることを念頭に置いた。

3) 実験より求めた応力緩和量より、「温度時間換算則」を用いて任意温度、任意初期設定応力、任意時間の予測応力緩和量を求める。そして、温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力を、コンクリートの熱膨張係数と予測応力緩和量より算出し、実験値と比較検討する。

4) 上記実験と同時に、非拘束方向のひずみを測定し、検討する。

2. 実験方法

2.1 供試体の製作

(1) 供試体の形状

供試体は、図—1に示す113.0×113.0×113.0 mmの立方体状コンクリートの稜を5 mm面取りした形状の面取立方供試体とした。供試体の仕上げ精度を高くするために、特別の鋼製型わくを用いた。

また、供試体内部に温度分布を測定するCu-Co熱電対を埋設した。

(2) 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント

細骨材：川砂

粗骨材：川砂利

化学混和剤：AE剤

骨材の物理的性質を表—1に示す。

(3) 調合

実験に用いたコンクリートの調合を表—2に示す。

(4) 養生

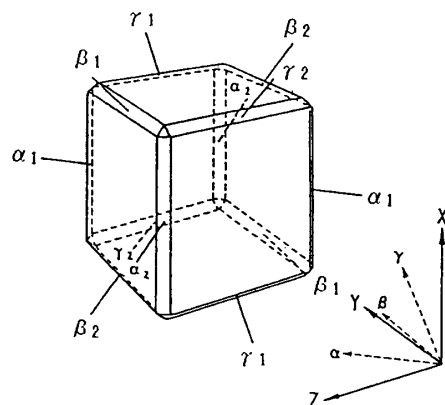
コンクリート打設後、6時間でキャッピング、24時間で脱型し、以後材令2カ月まで水中養生とした。さらに、安定した条件を得るため、供試体をあらかじめ1週間気中養生後3日間105℃で加熱乾燥させ、含有水分を完全に放出させておいた。

2.2 載荷方法

実験に用いた三軸圧縮引張試験機を、図—2に示す。

この試験機は、供試体に同時に直交3方向に圧縮力と引張力を加えることができる。一方向の反力フレームは直径120 mmの4本の鋼棒で構成されており試験機全体の剛性は高い。また、荷重が供試体の全断面に均等に分布し、偏心荷重とならないように調心球座を備えている。載荷板は、端面摩擦による拘束を除くため、鋼製ブラシ載荷板を使用した。なお供試体を加熱する際、熱がロードセルに伝わるのを防ぐために、断熱板を載荷板とロードセルの間に挿入した。

2.3 加熱方法



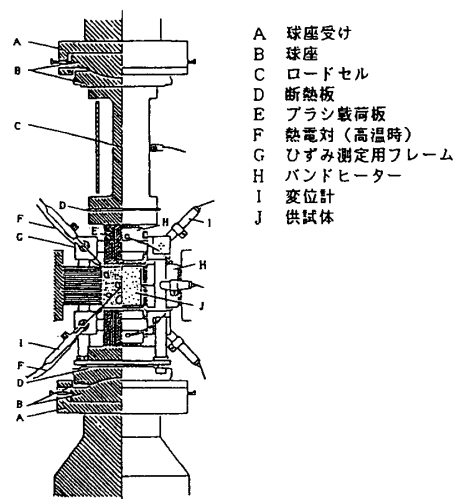
図—1 面取立方供試体と変位計の取り付け位置

表—1 骨材の物理的性質

	比 重		吸水率 (%)	粗粒率
	絶乾状態	表乾状態		
細骨材	2.43	2.49	1.91	3.00
粗骨材	2.51	2.54	1.25	6.87

表—2 コンクリートの調合表

粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m³)				
					水	セメント	細骨材川砂	粗骨材川砂利	化学A混和剤(g)
20	15	51	36	4	173	333	629	1145	100



図—2 三軸圧縮引張試験機

供試体の温度は、図—3に示す位置にあらかじめ埋設しておいたCu-Co熱電対により測定した。そして、3方向6個の鋼製ブラシ載荷板に、それぞれバンドヒーター(500 W×2)を取り付け加熱した。温度制御は、供試体の中心部の温度に基づき、ヒーター電圧を変圧器で制御することによって調整した。なお、供試体に有害な熱応力を生じさせないために、本実験の昇温の速度は毎時10℃を目標とした。

2.4 ひずみ測定方法²¹⁾

図—1に示す供試体の面取り部分に12個の変位計を

6方向から対にして取り付ける。そして、 α, β, γ 方向から求めたひずみ $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \varepsilon_\gamma$ を、式(1)に代入して X, Y, Z 方向のそれぞれのひずみを求める。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_\beta \\ \varepsilon_\gamma \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

このひずみ測定方法は、ひずみ算定の基礎となる変位測定区間が供試体の局部や表層部分だけでなく、常に中心を含む供試体全体にわたっているため安定したひずみの測定が期待できる。

2.5 熱膨張係数の測定

あらかじめ105°Cで加熱乾燥させた面取立方供試体を用い、熱膨張係数を測定した。ひずみ拘束を与えずに、30°Cから100°Cまでコンクリートを昇温し、10°Cおきにひずみを測定する。昇温速度は、毎時10°Cとする。

2.6 温度上昇時の膨張ひずみ拘束実験

(1) ひずみ拘束方向の応力の測定

供試体を初期設定応力レベルまで X 軸方向に載荷し、その時の瞬間弾性ひずみを設定ひずみとする。初期設定応力レベルは、応力度/強度比で0/6, 2/6とする。次に載荷方向をひずみ拘束方向(X 軸方向)とし、ひずみ拘束方向の設定ひずみを一定に保持し、供試体を30°Cから100°Cまで昇温する。この間、10°Cごとに供試体内の温度分布一様な場を作り、各温度でのひずみ拘束方向の応力を測定する。なお、昇温速度は、図-4のように毎時10°Cとした。

(2) 非拘束方向のひずみの測定

上記実験と同時に、非拘束方向(Y, Z 軸方向)のひずみを測定する。

2.7 応力緩和実験

(1) ひずみ拘束方向の応力の測定

20°C, 60°C, 100°C各一定温度下で、供試体を下記の各初期設定応力レベルまで X 軸方向に載荷し、その時の瞬間弾性ひずみを設定ひずみとする。載荷方向をひずみ拘束方向(X 軸方向)とし、ひずみ拘束方向の設定ひずみを実験中一定に保持し、その間のひずみ拘束方向の応力(拘束力)を測定する。

応力緩和実験の一定に保持する設定ひずみレベルは、載荷時の初期設定応力レベルで規定した。その初期設定応力レベルは次のように設定する。

温度：初期設定応力レベル(応力度/強度比)

20°C：1/6, 2/6, 3/6, 4/6

60°C：2/6, 3/6

100°C：2/6, 3/6

(2) 非拘束方向のひずみの測定

上記実験と同時に、非拘束方向(Y, Z 軸方向)のひずみを測定する。

3. 実験結果と考察

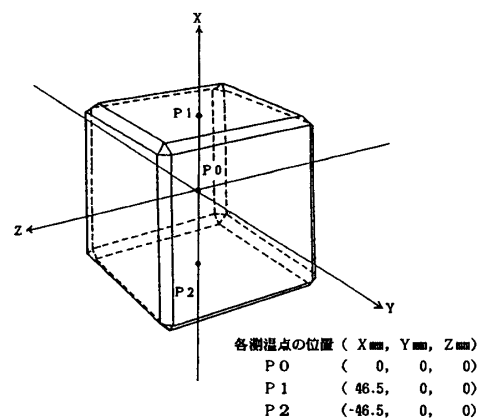


図-3 供試体の測温点の位置

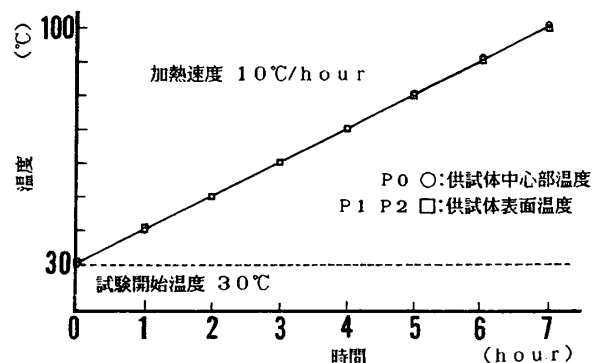


図-4 コンクリート供試体の加熱速度

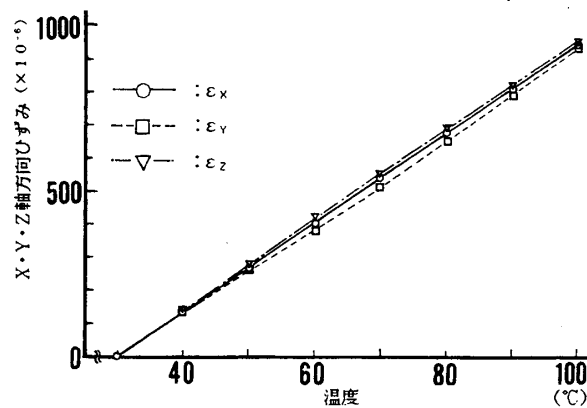


図-5 コンクリートの熱膨張の実験結果

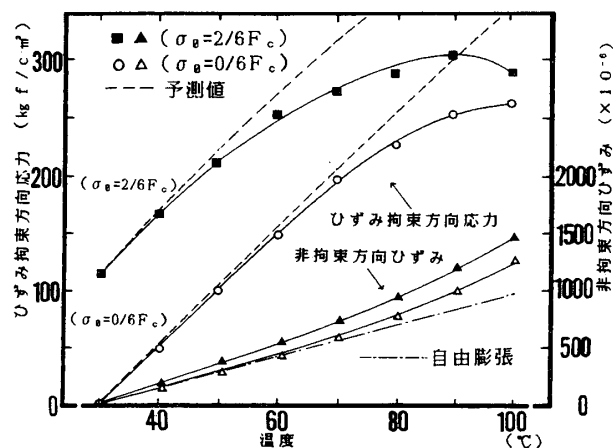


図-6 膨張ひずみ拘束応力の実験結果

3.1 熱膨張係数の測定

コンクリートの熱膨張ひずみの測定結果を各軸方向別に図—5に示す。あらかじめ105℃で加熱乾燥させたコンクリートの膨張ひずみは、各軸とも温度変化に伴いほぼ直線的に増加し、熱膨張係数 α は30℃から100℃の温度範囲内においては、一定とみなすことができる。実験結果より、各軸方向とも $\alpha=13.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。

3.2 温度上昇時の膨張ひずみ拘束実験

(1) ひずみ拘束方向の応力の測定

図—6に、ひずみ拘束方向の応力（膨張ひずみ拘束応力）と温度の関係の実験結果を実線で示す。一定に保持した設定ひずみは、載荷時の初期設定応力レベル（応力度/強度比）で規定している。圧縮強度を実験結果より340 kgf/cm²としたので、載荷時の初期設定応力度は、初期設定応力レベルが0/6（応力度/強度比）の場合は0 kgf/cm²、初期設定応力レベルが2/6（応力度/強度比）の場合は113 kgf/cm²である。

膨張ひずみ拘束応力（ひずみ拘束方向応力）は、初期設定応力レベルが応力度/強度比で0/6、2/6のどちらも、温度上昇に伴い増加する。また、膨張ひずみ拘束応力の増加の割合は、温度上昇に伴う膨張ひずみ拘束応力が大きくなるにしたがい、小さくなる。

次に、熱膨張係数 α を用いて膨張ひずみ拘束応力を予測する。膨張ひずみ拘束応力の意味を、温度上昇による熱膨張ひずみの増加分を圧縮応力を加えることで拘束することと考える。

温度上昇に伴う膨張ひずみを、フックの法則に代入することにより式（2）が成り立つ。

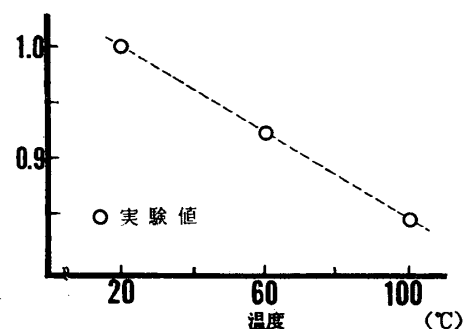
$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] - \alpha \Delta T \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] - \alpha \Delta T \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] - \alpha \Delta T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 E ：ヤング係数、 ν ：ポアソン比、 α ：熱膨張係数、 ΔT ：温度変化量とする。

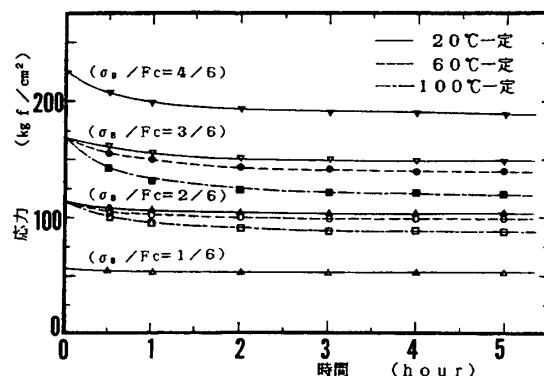
ヤング係数 E は温度により変化すると仮定し、20℃、60℃、100℃各一定温度下のヤング係数を面取立方供試体を用いて求めた。図—7に、20℃のヤング係数を基準にした、各温度のヤング係数の割合を示す。図—7より20℃から100℃の温度範囲内においては、温度上昇に伴いヤング係数の割合は直線的に減少している^{文27)}と仮定できる。ここで、ヤング係数 E' を温度を考慮した次式で表す。

$$E' = E_{20} \times (1 - 0.001925(T - 20)) \dots\dots\dots (3)$$

また式（2）に、ひずみ拘束方向のひずみが一定（すなわち $\epsilon_x = \epsilon_0$ ）であることと、非拘束方向の応力が0（すなわち $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ）であることを代入することより、



図—7 各温度下のヤング係数



図—8 応力緩和の実験結果

30℃より温度上昇させた、膨張ひずみ拘束応力 σ_x を式（4）で表すことができる。

$$\sigma_x = E' \left(\epsilon_0 + \int_{30}^T \alpha \Delta T \right) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 ϵ_0 は載荷時のひずみ拘束方向の初期設定ひずみとする。

式（4）より求めた予測値を、図—6に破線で示す。この図より、熱膨張係数とヤング係数のみを考慮した予測値は、温度上昇に伴う膨張ひずみ拘束応力が大きくなるほど、実験値と差が大きくなることから、これは、コンクリートの応力緩和の影響があるためと考える。

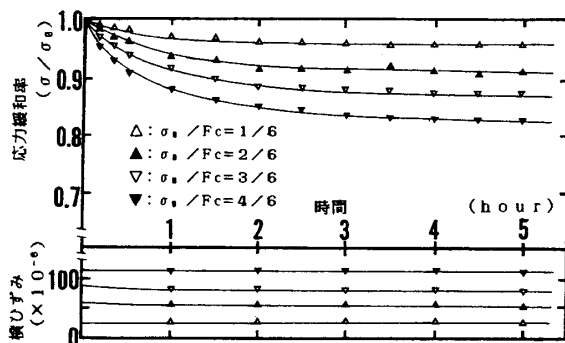
(2) 非拘束方向のひずみの測定

図—6に、非拘束方向のひずみの測定値と温度の関係を示す。初期設定応力レベルが応力度/強度比で0/6、2/6とも、温度上昇に伴う膨張ひずみ拘束応力が小さい時は、非拘束方向のひずみは、ほぼ直線的に増加する。その後温度が上昇して、膨張ひずみ拘束応力が増加するにつれて、非拘束方向のひずみの増加の割合は大きくなる。また、初期設定応力レベルが大きいほど非拘束方向のひずみの増加の割合は大きい。拘束力を与えない状態で熱膨張させた自由膨張のひずみに比べ、一方向に拘束力を与えた状態で熱膨張させた非拘束方向のひずみは、明らかに大きい。

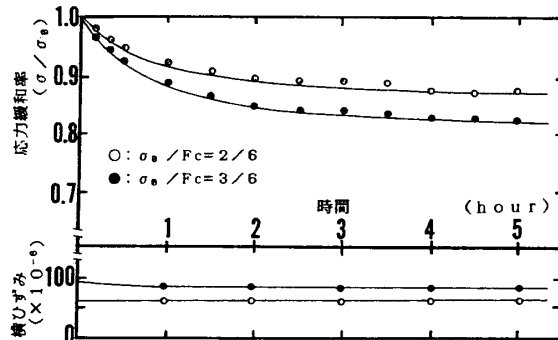
3.3 応力緩和実験

(1) ひずみ拘束方向の応力の測定

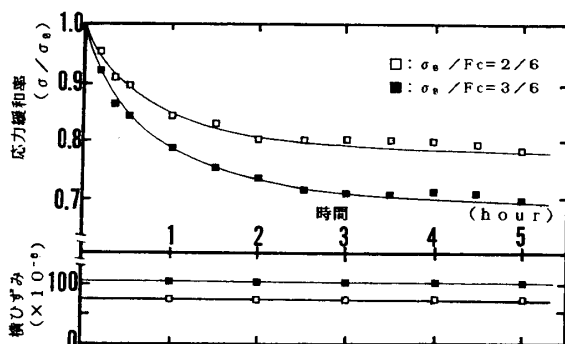
載荷後5時間までの応力緩和の実験結果を、図—8に示す。同一初期設定応力度では、応力緩和量は温度が高



図—9 応力緩和率と非拘束方向のひずみ (20°C)



図—10 応力緩和率と非拘束方向のひずみ (60°C)



図—11 応力緩和率と非拘束方向のひずみ (100°C)

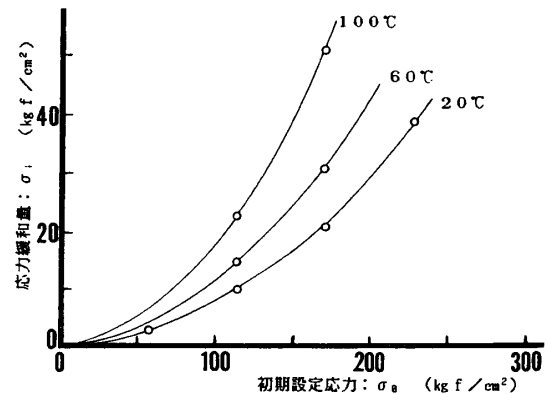
いほど大きくなる。

図—9, 10, 11 に 20°C, 60°C, 100°C の各一定温度での応力緩和率の変化を示す。応力緩和率は、一定ひずみにおける t 時間後の応力度（すなわち、初期設定応力度から応力緩和量を減じたもの）を、載荷時の初期設定応力度で除したものとす。応力緩和率は、relaxation ratio^{X15)} の訳である。これより、各温度とも、初期設定応力レベルが大きいほど応力緩和率の減少が大きいことが分かる。

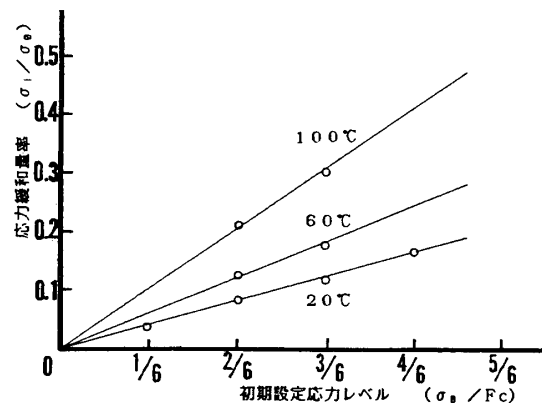
(2) 非拘束方向のひずみの測定

図—9, 10, 11 に応力緩和時の非拘束方向のひずみの挙動（Y, Z 軸方向の平均のひずみ）を示す。

これによると非拘束方向のひずみは、各温度、各初期設定応力レベルとも、一定あるいは若干の減少を示す。しかしほぼ一定値と見なせるので、応力緩和時の体積ひずみ変化がないと考えられる。



図—12 初期設定応力と5時間後の応力緩和量



図—13 初期設定応力レベルと5時間後の応力緩和量率

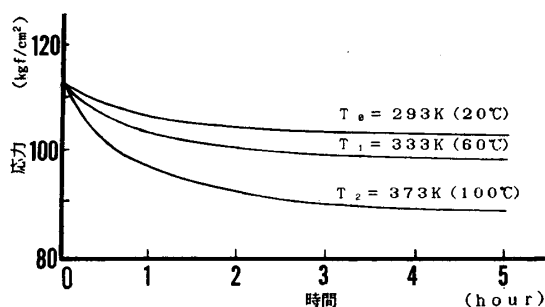
4. 応力緩和による温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力の考察

実験より求めた応力緩和量より、「温度時間換算則」を用いて任意温度、任意初期設定応力レベル、任意時間の予測応力緩和量を求める。そして、温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力を、コンクリートの熱膨張係数、ヤング係数と予測応力緩和量より算出し、実験値と比較検討する。

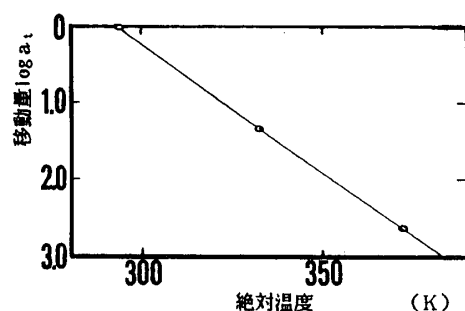
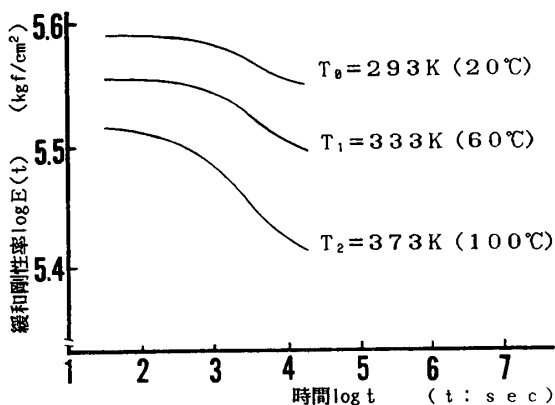
4.1 任意温度、任意初期設定応力レベルによる応力緩和量

応力緩和実験で、一定温度（20°C, 60°C, 100°C）、一定初期設定応力レベル（応力度/強度比が 1/6, 2/6, 3/6, 4/6）での応力緩和量を求めた。これらより、任意温度、任意初期設定応力レベルの応力緩和量を求める。

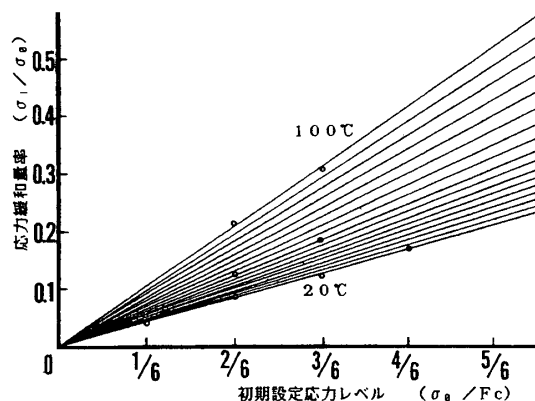
(1) まず、図—8 の応力緩和量より 5 時間後の応力緩和量を求め、図—12 に初期設定応力と各温度の 5 時間後の応力緩和量の関係を示す。応力緩和の考察において、終局値の 1/2 に達する時間を基準にする場合も多いが、本研究では 5 時間目を基準にした。これは、応力緩和はクリープと比べ早く終局値に達しやすいこと、また本研究の考察では 5 時間までの応力緩和量が必要であることを考慮した。次に、図—13 に初期設定応力レベルと各温度の 5 時間後の応力緩和量率の関係を示す。応力緩和量率は、応力緩和量を載荷時の初期設定応力度で除したものとす。これによると、一定温度下で 5 時間後



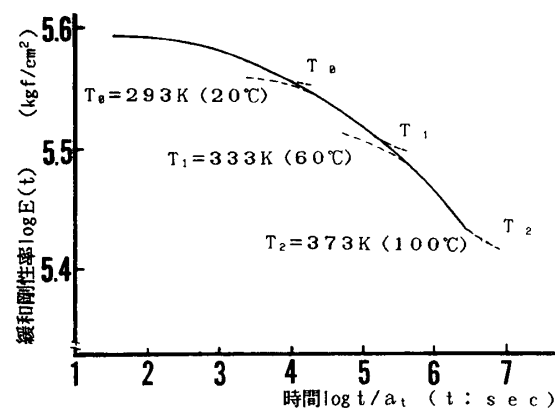
図—14 初期設定応力レベル (2/6) の応力緩和

図—17 移動量 a_t と絶対温度 T の関係

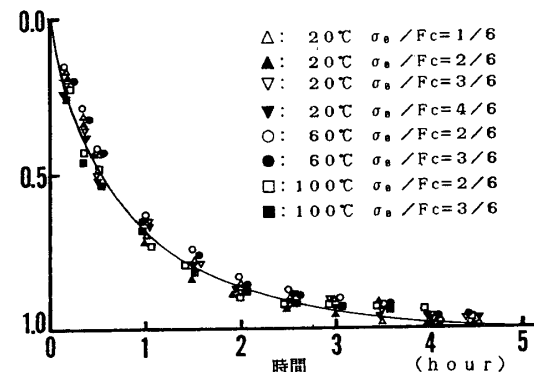
図—15 変換した緩和剛性率曲線



図—18 初期設定応力レベルに対する各温度 (5°Cごと) の 5 時間後の応力緩和量率



図—16 合成曲線



図—19 5 時間後の応力緩和量を 1.0 として得た応力緩和近似曲線

の応力緩和量率は初期設定応力レベルにほぼ比例している。

この関係より任意温度下での 5 時間後の応力緩和量率を考えてみる。

(2) 20°C, 60°C, 100°C の 3 種類の一定温度から「温度時間換算則^{文22), 23)}」を適用して、応力度/強度比が 2/6 の一定初期設定応力レベルの、20°C から 100°C までの任意温度の応力緩和量を求める。コンクリートのクリープに「温度時間換算則」を適用した例は、Mukaddam, Bresler^{文24)}, Fahmi^{文25)}, 大岸^{文26)}らがある。ここでは、コンクリートの応力緩和に「温度時間換算則」を適用する。

まず、図—14 に初期設定応力レベルが応力度/強度比が 2/6 の、各温度の 5 時間までの応力変化を示す。つき

に、各温度の応力変化を図—15 のように、縦軸を緩和剛性率^{文22), 23)}、横軸を時間の対数に変換する。緩和剛性率は応力を、一定に保持した設定ひずみで除したものと

$$\text{緩和剛性率 } E(t) = \sigma(t) / \epsilon_0 \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 ϵ_0 は設定ひずみ、図の対数は常用対数とする。

次に図—15 の各曲線を、20°C を基準に時間軸に沿って平行移動させ、図—16 の合成曲線を作成する。この時間軸に沿って平行移動させた量 $\log a_t$ は、図—17 のように絶対温度 T の関数で表せる。これにより任意温度の移動量 $\log a_t$ が求められるので、任意温度の緩和剛性率曲線を求めることより、任意温度の応力緩和曲線を求めることができる。

同様に、応力度/強度比が 1/6, 3/6, 4/6 の初期設定応

力レベルの時もそれぞれについて行った。

これにより任意温度、任意初期応力レベルの5時間後の応力緩和量が求められる。図一18に初期設定応力レベルに対する、5°Cごとの各温度における5時間後の応力緩和量率の関係を示す。

(3) つぎに、図一8の応力緩和の実験結果より求めた、5時間後の応力緩和量を基準にとった応力緩和の実験値を図一19に示す。これによると5時間後の応力緩和量に対する、5時間までの応力緩和量の進行割合は、初期設定応力レベル⁽⁵⁾や温度により大きな差がみられないので、これを一本の曲線に近似し、応力緩和近似曲線とした。

以上より、図一18の5時間後の応力緩和量率と図一19の応力緩和近似曲線を用いることにより、任意温度、任意初期設定応力レベルの5時間までの任意時間の応力緩和量を求めることができる。

4.2 応力緩和を考慮した温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力の予測

任意温度、任意初期設定応力レベル、任意時間の予測応力緩和量を考慮に入れ、熱膨張係数とヤング係数より温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力を予測する。

応力緩和曲線は、温度(T)、初期設定応力レベル(X)、時間(t)のパラメーターとして表すことができるので、応力緩和量を $f(T, X, t)$ で表す。図一20のように $\Delta T^{\circ}\text{C}$ ごとの温度、初期設定応力レベルの上昇に伴う応力緩和曲線 $f(T_1, X_1, t)$ 、 $f(T_2, X_2, t)$ 、 $f(T_3, X_3, t)$ …を想定する。次に、温度、初期設定応力レベルが上昇する場合の応力緩和曲線の乗り移りを考える。 $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 上昇するのにかかる時間を t' とすると、応力緩和量は $\Delta T^{\circ}\text{C}$ ごとに応力緩和曲線上を t' 時間進んで、次の応力緩和曲線に乗り移る(例、 $P_1 \rightarrow P'_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P'_2 \rightarrow P_3 \dots$)。昇温速度が、毎時 10°C より、 $t' = 360 \times \Delta T$ 秒とする(例、 $P'_1 \rightarrow P_2$ 、 $P'_2 \rightarrow P_3$ 、…)。

応力緩和量 ΔP_n は、

$$\Delta P_n = f(T_n, X_n, t_n + t') - \left(\sum_{n=0}^{n-1} \Delta P_n \right) \dots \dots \dots (6)$$

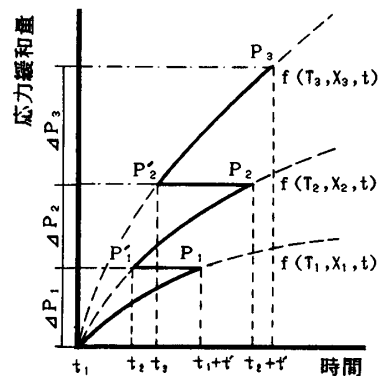
で表せる。ただし、 $\Delta P_0 = 0$ とする。ここで、時間 t_n は、

$$f(T_n, X_n, t_n) = f(T_{n-1}, X_{n-1}, t_{n-1} + t') \dots \dots (7)$$

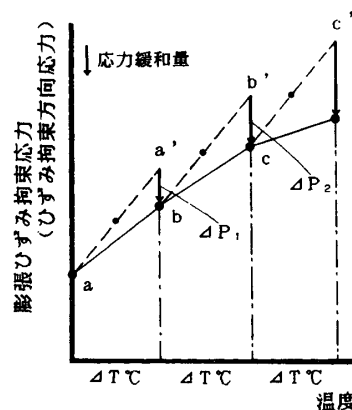
で求められる。ただし、 $t_1 = 0$ とする。

次に、温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力を、コンクリートの熱膨張係数、ヤング係数と予測応力緩和量より予測する。図一21のように初期設定応力 a である場合の、 $\Delta T^{\circ}\text{C}$ ごとの膨張ひずみ拘束応力を考えてみる。この場合、予測応力緩和量を決定する設定温度、初期設定応力レベルは、常に変化するため次のように考察した。

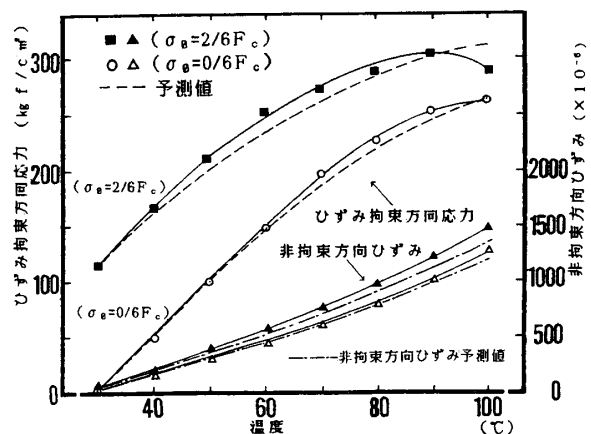
$\Delta T^{\circ}\text{C}$ 上昇後、コンクリートの熱膨張係数と温度によるヤング係数を用い、式(2)より応力 a' を求める。次に予測応力緩和量を求めるために応力 a と応力 a' の



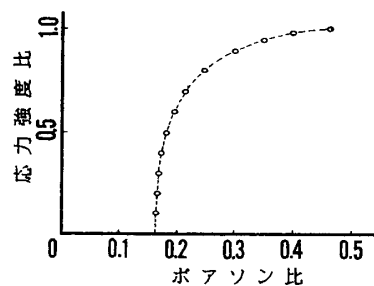
図一20 応力緩和曲線の乗り移り概念図



図一21 膨張ひずみ拘束応力の予測



図一22 膨張ひずみ拘束応力の実験結果と予測値の比較



図一23 応力度/強度比とポアソン比の関係

平均応力を初期設定応力とし、初期設定応力レベルを求めた。また応力 a と応力 a' のそれぞれの温度の平均温度を設定温度とする。この初期設定応力レベル、設定温

度での5時間後の応力緩和量を図—18より求め、図—19の応力緩和近似曲線を用いて応力緩和曲線を求める。次に、時間 t' の応力緩和量 ΔP_1 を求め、これを予測応力緩和量とする。コンクリートの熱膨張係数より求めた応力 a' より、予測応力緩和量 ΔP_1 を減ずることにより、温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力の予測値 b を得ることができる。

同様に、応力 b についても、予測応力緩和量 ΔP_2 を求め、応力 b' より予測応力緩和量 ΔP_2 を減ずることにより、温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力の予測値 c を得る。これを繰り返すことにより、30°Cから100°Cまでの温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力の予測値を求めた。

図—22に、 $\Delta T^\circ\text{C}=2.5^\circ\text{C}$ として、応力緩和を考慮に入れた予測値を破線で示す。この予測値は実験値によく近似している。特に、温度上昇に伴う膨張ひずみ拘束応力が大きくなるほど、その増加の割合が小さくなることを表すことができる。

したがって、コンクリートの温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力は、コンクリートの熱膨張係数、ヤング係数と「温度時間換算則」を適用した予測応力緩和量より算出できる。

また、別調合のコンクリート供試体について、同様の実験を行った。ただし、コンクリートの熱膨張係数は、 $11.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であった。そして、本論の方法で求めた予測値と実験値を比較した結果、よく一致した⁽¹¹⁾。

5. 膨張ひずみ拘束時の非拘束方向のひずみの考察

非拘束方向のひずみ $\varepsilon_y, \varepsilon_z$ は、式(2)より $\varepsilon_x = \varepsilon_0, \sigma_y = \sigma_z = 0$ を代入することにより式(8)で表せる。

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -(1 + \nu)\alpha\Delta T - \nu\varepsilon_0 \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 ε_0 は拘束方向の初期設定応力ひずみとする。

ところがポアソン比は、応力の増加に伴い増加する。そこで面取立方供試体を用いた一軸圧縮試験時の、応力度/強度比に対するポアソン比の変化を、図—23に示す。

応力度/強度比に対するポアソン比を用いた、非拘束方向のひずみの予測値を図—22に一点破線で示す。これは、非拘束方向のひずみの曲線的増加や、初期設定応力レベルによる増加の割合の差がよく表せる。

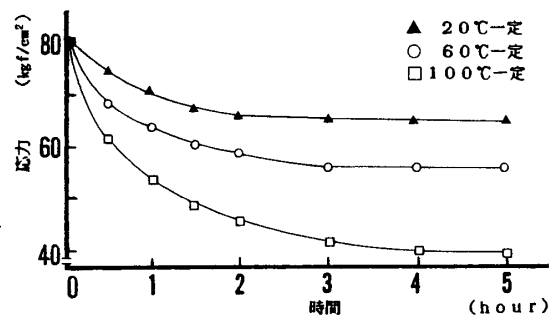
6. 結 論

単軸ひずみ拘束された乾燥コンクリートの、温度上昇時(30°C~100°C)の膨張ひずみ拘束応力と応力緩和について、本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

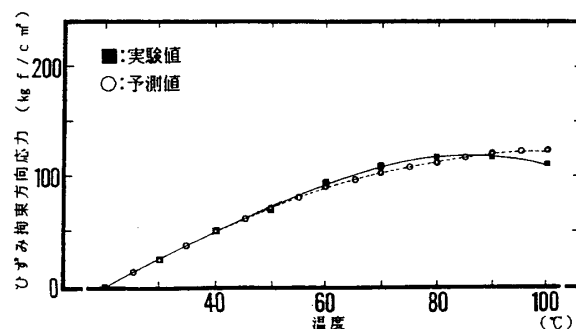
1. 膨張ひずみ拘束応力は温度上昇に伴い増加する。また、膨張ひずみ拘束応力の増加の割合は、温度上昇に伴う膨張ひずみ拘束応力が大きくなるほど、小さくなる。
2. 応力緩和量は、応力度/強度比が4/6では初期設定応力レベルが大きいほど大きく、20°Cから100°Cの温度範囲内では、温度が高いほど大きい。また、一定温

付表—1 コンクリートの調合表

粗骨最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材川砂	粗骨材川砂利	化学A混和剤(g)
20	18	53	41	4	176	332	698	1058	116



付図—1 初期設定応力レベル(2/6)の応力緩和



付図—2 膨張ひずみ拘束応力の実験結果と予測値の比較

度下の5時間後の応力緩和量を、載荷時の初期設定応力度で徐した応力緩和量は、応力度/強度比が4/6以下の初期設定応力レベル内においては、初期設定応力レベルに比例する。

3. コンクリートの温度上昇時の膨張ひずみ拘束応力は、本論のような方法で、コンクリートの熱膨張係数、ヤング係数と「温度時間換算則」を適用した予測応力緩和量より算出できる。

4. 膨張ひずみ拘束時の非拘束方向のひずみは、応力度/強度比に対するポアソン比を考慮することにより、式(8)より近似できる。

謝 辞

本研究は、名古屋工業大学・工学部・講座研究費、一般設備費をはじめ文部省科学研究費一般研究B, C, 試験研究などにより行われたものである。

共同研究者としてご指導ご協力いただいた本学岩下恒雄、大岸佐吉、棚橋 勇、東京工業大学仕入豊和、滝口克己、地濃茂雄、故原田 有の7博士、ならびに当時の卒論生水谷節郎、名知博司、吉口勝史の3氏に厚く謝意を表す。また、材料を提供いただいた三菱鉱業セメントにお礼を申し上げる。

なお、本研究は第2著者が客員教授として、東京工業

大学工業材料研究所に所属していた時に得られた知見によるところが大であることを記し、その機会を与えられた同大学古村福次郎教授、および安部武雄助教授に厚くお礼を申し上げる。

注

- 1) 本研究の方法の妥当性を確認する意味で、別調合のコンクリート供試体を用いて、実験考察を行った。コンクリートの調合は付表—1に、骨材の物理的性質は、表—1に示す。付図—1に示すように、初期設定応力レベルは応力度/強度比が、2/6のみの応力緩和実験を行った。初期設定応力レベルと応力緩和量率は比例するとし、これより予測応力緩和量を求め、コンクリートの熱膨張係数より膨張ひずみ拘束応力を予測した。ただし、熱膨張係数は、実験より 11.4×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$) とした。付図—2に実験値と予測値を示す。これより両者は近似していると言える。

参考文献

- 1) 例えば、マスコンクリートの温度応力研究小委員会：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，昭和57年9月
- 2) マスコンクリートの温度応力研究小委員会：第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，昭和59年3月
- 3) マスコンクリートの温度応力研究委員会：外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案，マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，昭和60年
- 4) 名和修司，岩山孝夫ほか：RCボックスカルバートの温度応力に関する研究，第10回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.181~186，昭和63年
- 5) 平田正成，小柳 治ほか：温度応力解析における若材令コンクリートのリラクセーション特性について，第8回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.37~40，昭和61年
- 6) 平田正成，小柳 治ほか：マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析，第9回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.19~24，昭和62年
- 7) 森本博昭，小柳 治：Compensation Plane法による温度応力のリラクセーション解析，第10回コンクリート工学年次論文報告集，pp.145~150，昭和63年
- 8) 山崎庸行，森永 繁：定圧縮ひずみ下におけるコンクリートの熱応力に及ぼす加熱速度の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.117~118，昭和61年8月
- 9) 吉田 一：原子炉建屋の熱応力設計，コンクリート工学，Vol.22，No.3，pp.66~69，1984，March
- 10) 日本建築学会構造委員会原子力プラントコンクリート構造分科会：原子力用コンクリート構造の熱応力設計法，昭和60年3月
- 11) 青山博之：高層鉄筋コンクリート建物の現状と今後の問題点，コンクリート工学，Vol.24，No.5，pp.4~13，1986，May
- 12) Taylor, M. A. and Maurer, G. K. : Short-Term Stress Relaxation of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 84, pp.123~135, 1973, Sep.
- 13) Neville, A. M. : Creep of Concrete : Plain, Reinforced, and Prestressed, North-Holland Publishing Company, 1970
- 14) 西林新蔵，木山英郎：コンクリートの応力緩和に関する一研究，土木学会論文報告集，第241号，pp.145~153，昭和50年9月
- 15) Brooks, J. J. and Neville, A. M. : Relaxation of Stress in Concrete and Its Relation to Creep, A. C. I. Journal, pp. 227~232, 1976, Apr.
- 16) 谷川恭雄，山田和夫ほか：コンクリートの応力緩和特性とクリープ特性について，第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.69~72，昭和54年
- 17) Schneider, U. und Kordina, K. : Über das Verhalten von Beton unter hohen Temperaturen, beton, pp.572~581, 1975, Dec.
- 18) Schneider, U. : Behaviour of Concrete at High Temperature, 1982
- 19) 森永 繁，山崎庸行，林 章二訳：シュナイダー著，コンクリートの熱的性質，技報堂出版，昭和58年
- 20) 岡島達雄，河辺伸二，岩下恒雄，大岸佐吉：多軸応力下のコンクリートの熱膨張とクリープ，日本建築学会構造系論文報告集，第390号，pp.1~9，昭和63年9月
- 21) 岡島達雄，河辺伸二，岩下恒雄：多軸応力下のコンクリートのひずみ測定方法，日本建築学会構造系論文報告集，第384号，pp.50~57，昭和63年2月
- 22) 神原 周ほか：「力学的性質Ⅱ」 高分子実験学，第10巻，共立出版株式会社，昭和58年9月
- 23) 村上謙吉：「やさしいレオロジー—基礎から最先端まで—」，産業図書株式会社，昭和61年6月
- 24) Mukaddam, M. A. and Bresler, B. : Behavior of Concrete under Variable Temperature and Loading, Concrete for Nuclear Reactors, Special Publication SP-34, Vol. 2, A. C. I. 1972
- 25) Fahmi, H. M. : Time-Dependent Behavior of Concrete under Sustained Load and Cyclic Temperature, Structure and Materials Research, April, 1972, Report No. UC SESM 72-6
- 26) 大岸佐吉，和田光生ほか：コンクリートの高温多軸クリープの研究，その5，温度20~320 $^{\circ}\text{C}$ の三軸等圧縮クリープ特性，日本建築学会論文報告集，第285号，pp.1~11，昭和54年11月
- 27) 岸谷孝一，嵩 英雄，押田文雄，大野定俊：300 $^{\circ}\text{C}$ までの高温に長期間さらされたコンクリートの性状に関する実験的研究，セメント・コンクリート，No.444，pp.7~14，1984，Feb.
- 28) 岡島達雄，河辺伸二：高温下のコンクリートの応力緩和，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.309~312，昭和61年
- 29) 岡島達雄，河辺伸二，志村欣一，水谷節郎：多軸拘束されたコンクリートの熱応力と応力緩和，日本建築学会大会学術講演梗概集（A），pp.575~576，昭和63年10月

SYNOPSIS

UDC : 691.32 : 666.97 : 624.042

THE STRESS OF CONCRETE FOR HEATING UNDER CONSTANT STRAIN

by **SHINJI KAWABE**, Graduate Student of Nagoya Inst. of Tech., and Dr. **TATSUO OKAJIMA**, Prof. of Nagoya Inst. of Tech., Members of A.I.J.

The purpose of this study is to predict the stress of concrete for heating under constant strain.

The free thermal expansion of concrete were measured for heating from 20°C to 100°C.

The stress relaxations were measured for five hours at the constant temperature of 20°C, 60°C, and 100°C. The initial stress levels of the stress relaxations were 1/6, 2/6, 3/6 and 4/6 of compressive strength.

The concrete specimens were heated from 30°C to 100°C, and the stress were measured under constant strain.

The conclusion is the following ;

For equal levels of initial stress, stress relaxation increases with temperature of concrete, within the limits of this experiment.

As the initial stress level in concrete is increased, the stress relaxation also increases.

The stress of concrete for heating under constant strain, could be predicted from the free thermal expansion and from stress relaxation.